Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXV, вып. 2, 1973 г.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОБАЛЬТА В ГЛАВНЫХ МИНЕРАЛАХ РУД И ПРОЖИЛКОВ НА УЧАСТКЕ САРБАЙСКОГО КАРЬЕРА

Н. Л. Шаманина, Н. И. Руденко, Т. А. Великоборец

Изучение закономерностей распределения элементов-примесей является необходимым дополнением к генетической и промышленной характеристике руд и приобретает особое значение в связи с проблемой их комплексного использования. В рудах Сарбайского месторождения железу как ведущему рудообразующему элементу сопутствует значительное число элементов-примесей, важнейшим из которых является кобальт.

Таблица 1

Среднее содержание кобальта в рудах, породах, главных рудных минералах

Объекты химического анализа			Число анализов (проб)	Содержание кобальта, усл. ед.		
				минимальное	максимальное	среднее
Руды			29	2,5	75	30
Породы			5	2,5	22	12,5
Минералы	руд	магнетит	32	0	8	1,8
		пирит	29	182	570	349
	прожилков	магнетит	28	0	12,5	4,5
		гематит	2	7,5	10	8,8
		пирит	68	25	3225	420
		пирротин	1	—	—	1338
		марказит	1	—	—	188
		халькопирит	1	—	—	15
		арсенопирит	1	—	—	700
	пород	магнетит	5	0	6,2	2,2
		пирит	4	230	370	250

В статье приводятся результаты исследования мономинеральных проб. Исследование проводилось с целью установить закономерности поведения кобальта в рудах и главных минералах руд и прожилков.

Пробы из руд отбирались в пределах вскрытой карьером Восточной рудной залежи, где развиты полосчатые и однородные сульфидно-магнетитовые руды с пироксеном, гранатом, реже скаполитом. Пробы минералов были взяты из прожилков различного состава — от ранних пироксен-скаполитовых с пиритом до наиболее поздних пирит-гематит-кальцитовых с халькопиритом и цеолитами.

Изучение кобальтоносности рудных минералов показало, что повышенные содержания кобальта связаны с пиритом. Исследованием руд на участке карьера установлена прямая зависимость между содержаниями кобальта, серы и железа в руде (рис. 1) и обратная между содержанием кобальта в пирите и количеством пирита (серы) в руде (рис. 2). Эта закономерность отмечалась ранее для руд Соколовского месторождения [6]. Однако на фоне отмеченной закономерности устанавливаются значительные различия в уровне и характере распределения кобальта в рудах, породах, минералах руд и прожилков (табл. 1).

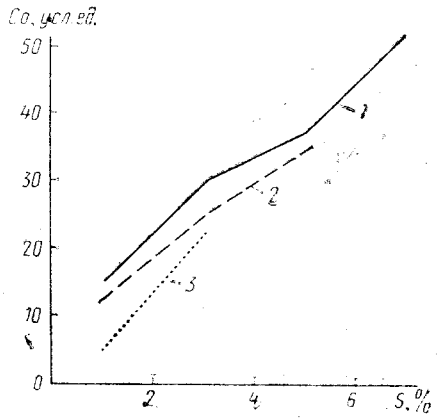


Рис. 1. Зависимость содержания кобальта в рудах от содержания в них серы

1 — богатые руды (Fe > 50%); 2 — бедные (Fe=30÷ 50%); 3— убогие (Fe=20÷ 30%)

Из табл. 1 видно, что наиболее кобальтоносным оказывается пирит из прожилков, относящийся к более поздним генерациям и образовавшийся как метасоматически, так и свободной кристаллизацией; это согласуется с данными И. А. Кочергина о повышенных содержаниях кобальта в более позднем прожилково-вкрапленном пирите [4]. Вкрапленный (метасоматический) пирит руд обладает повышенным содержанием кобальта по сравнению с аналогичным пиритом вмещающих пород. Единичные анализы прочих сульфидов показывают весьма повышенные содержания кобальта для пирротина прожилков, более позднего по сравнению с пирротином руд. Содержание кобальта в марказите пониженное, в халькопирите — минимальное для сульфидов, в позднем арсенопирите — повышенное. Содержание кобальта в магнетите минимальное, однако магнетит прожилков более кобальтоносен по сравнению с магнетитом руд. Отношение максимальных и минимальных содержаний кобальта в пиритах свидетельствует о более неравномерном характере распределения кобальта в пирите прожилков по сравнению с вкрапленным пиритом руд.

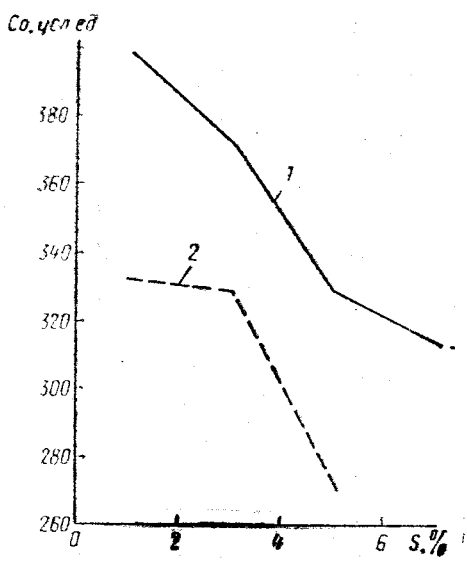


Рис. 2. Зависимость содержания кобальта в пирите руд от содержания в них серы

1 — богатые руды (Fe > 50%); 2 — бедные (Fe=30÷ 50%)

В результате группировки анализов проб по принципу их пространственного размещения (табл. 2) отчетливо прослеживается тенденция

Таблица 2

Изменение содержания кобальта в пирите и магнетите по простиранию рудной залежи

Объекты анализа	Участок	Номера разведочных профилей	Число анализов пирита	Содержание кобальта в пирите, усл. ед.			Число анализов магнетита	Содержание кобальта в магнетите, усл. ед.		
				минимальное	максимальное	среднее		минимальное	максимальное	среднее
Руды	Северный	VII—XI	5	260	548	395	6	0	2,5	0,8
	Центральный	XI—XV	8	188	410	292	10	0	4,8	1,8
	Южный	XV—XX	16	182	570	348	16	0	8	2
Прожилки	Северный	VII—XI	20	102	1272	512	19	0	10	4,2
	Центральный	XI—XV	17	25	3225	462	3	7,8	12,5	10
	Южный	XV—XX	31	52	962	338	6	0	5,2	2,8

Таблица 3

Изменение содержания кобальта в рудах, пирите и магнетите вкрест простирания рудной зоны

Объекты анализа	Участок вкрест простирания	Участок по простиранию									В целом по карьеру		
		Северный			Центральный			Южный					
		Среднее содержание кобальта, усл. ед.											
		в руде	в пирите	в магнетите	в руде	в пирите	в магнетите	в руде	в пирите	в магнетите	в руде	в пирите	в магнетите
Руды	Висячий бок	—	—	—	40	300	0	37,5	348	0,8	40	328	0,5
	Центр	25	395	0,8	15	312	2	50	405	1,2	32	378	1,5
	Лежачий бок	—	—	—	15	245	2	15	370	4,5	15	308	3
Прожилки	Висячий бок	—	240	5,5	—	—	7,8	—	—	—	—	240	5,8
	Центр	—	548	3,8	—	1175	—	—	342	3,5	—	612	3,8
	Лежачий бок	—	578	—	—	165	12,5	—	338	2,5	—	328	5

возрастания содержания кобальта в пирите руд и прожилков по простиранию рудной залежи с юга на север. В этом же направлении отмечается понижение содержаний серы в рудах [3]. Максимальные содержания кобальта в пирите руд характерны для тех мест северного участка, где распространены перекристаллизованные руды с жилами крупнокристаллического магнетита. Содержания кобальта в магнетите руд и прожилков северного участка пониженные, но на всех участках они в прожилковом магнетите выше, чем в рудном.

При анализе распределения кобальта в рудах и главных рудных минералах вкрест простирания рудной зоны (табл. 3) отмечается возрастание содержаний кобальта в рудах от лежачего к висячему боку рудной залежи. В этом же направлении увеличивается содержание железа в рудах [3]. В пирите же руд и прожилков максимальные содержания кобальта отмечаются в центре залежи, пониженные характерны для пирита из более сернистых руд лежачего бока рудной залежи. Пирит прожилков висячего бока рудной залежи обеднен по сравнению с лежачим, при этом содержание кобальта в пирите прожилков изменяется от висячего к лежачему боку более неравномерно, чем в пирите руд. В магнетите из руд и прожилков в центральной части залежи отмечаются сравнительно пониженные содержания кобальта.

Таблица 4

Изменение содержаний кобальта в рудах, пирите и магнетите с глубиной

Объекты анализа	Горизонты, *м*	Число анализов руды	Среднее содержание кобальта, усл. ед.	Число анализов пирита	Среднее содержание кобальта, усл. ед.	Число анализов магнетита	Среднее содержание кобальта, усл. ед.
Руды	120	4	25	4	275	4	3
	100	—	—	1	262	1	2,5
	80	3	18	2	285	3	1
	60	20	32	17	350	21	1,8
	40	2	18	5	402	2	0,5
Прожилки	120	—	—	4	215	1	5,2
	110	—	—	1	182	—	—
	100	—	—	9	180	1	1,2
	80	—	—	24	455	3	1,8
	60	—	—	16	672	10	4,2
	50	—	—	3	498	7	3,5
	40	—	—	11	220	3	6,2

Изменение содержания кобальта в рудах, пирите и магнетите с глубиной показано в табл. 4. Для руд, пирита руд и прожилков, магнетита прожилков характер распределения кобальта неравномерно-ритмичный на фоне слабо выраженного увеличения содержания на глубину. В пирите прожилков максимальное содержание кобальта отмечается на горизонте 60 *м*, на более глубоких горизонтах оно падает.

По результатам анализов пирита из прожилков, находящихся в различных по составу вмещающих породах (табл. 5), установлена определенная зависимость между составом разновозрастных вмещающих пород и кобальтоносностью пирита прожилков. Наименее кобальтоносным оказался пирит прожилков в роговиках и в альбитизированных и пироксенизированных туффитах, значительно выше содержание кобальта в пирите прожилков, находящихся в альбитизированных туфобрекчиях. Максимально обогащен кобальтом пирит из прожилков в скарнах, метасоматитах, нередко оруденелых, и особенно в рудах. Следует особо отметить весьма высокое содержание кобальта в пирите прожилков, находящихся в пироксен-альбитовых и пироксен-скаполитовых метасома-

Таблица 5

Изменение содержаний кобальта в пирите и магнетите прожилков в зависимости от состава вмещающих пород

Породы и руды	Число анализов пирита	Содержание кобальта в пирите, усл. ед.			Число анализов магнетита	Содержание кобальта в магнетите, усл. ед.		
		минимальное	максимальное	среднее		минимальное	максимальное	среднее
Роговики	8	25	292	128	1	—	—	12,5
Туффиты альбитизированные, пироксенизированные	2	102	228	165	4	2,5	10	5
Альбитизированные туфобрекчии	34	25	865	300	6	0	5,2	2,5
Скарны	9	152	1055	460	1	—	—	7,5
Метасоматиты пироксен-альбитовые и пироксен-скаполитовые	15	25	2135	522	5	2,5	10	5
Руды	23	25	3225	588	15	0	7,8	4,2
Диорит-порфириты	1	—	—	962	1	—	—	3,5

титах, образованных по туффитам лежачего бока рудной залежи, причем наиболее обогащен пирит прожилков, сосредоточенных на северном участке (см. табл. 3). Довольно отчетливо выражена полярность в поведении кобальта в пирите и магнетите прожилков в одинаковых по составу вмещающих породах.

Как отмечалось, в пирите прожилков содержание кобальта несколько выше, чем во вкрапленном пирите руд. При этом для метасоматических прожилков содержание кобальта в пирите выше (558 усл. ед.), чем в пирите прожилков выполнения (408 усл. ед.). Для метасоматических прожилков с увеличением их мощности и количества пирита, содержание кобальта в пирите уменьшается:

Число анализов	5	5	8
Мощность прожилка, *см*	1—2	4—5	10—30
Содержание кобальта, усл. ед.:			
минимальное	292	102	78
максимальное	3225	412	665
среднее	1365	335	232
Число анализов	10	6	7
Количество пирита в прожилке, %	Меньше 30	30—50	Больше 50
Содержание кобальта, усл. ед.:			
минимальное	152	78	102
максимальное	3225	865	585
среднее	922	330	235

В прожилках различного минерального состава обнаруживаются значительные расхождения в содержаниях кобальта. Как видно из табл. 6, содержание кобальта в пирите резко возрастает от ранних и внутри-

Таблица 6

Распределение кобальта в пирите различных типов прожилков

Относительный возраст прожилков	Типы прожилков	Генерация пирита	Число анализов	Содержание кобальта, усл. ед.		
				минимальное	максимальное	среднее
Ранние	Пироксен-скаполитовые	1	3	152	375	262
Внутрирудные	Жилы крупнокристаллического магнетита с пиритом	1	6	102	598	310
	Пирит-магнетит-гематитовые	1	7	45	295	160
Послерудные	Эпидот-пирит-гематитовые и эпидот-пирит-пренитовые	2	6	430	3225	1435
	Гематит-пиритовые и калишпат-пирит-гематитовые с кальцитом	3	15	155	1055	468
	Пирит-гематит-кальцитовые и пирит-халькопиритовые	4	12	152	388	258
	Поздние кальцитовые с пиритом	4	1	—	—	138
	Прожилки с перетертым пиритом из зон послерудных нарушений	—	7	25	162	100

рудных жил к послерудным эпидот-пирит-гематитовым и эпидот-пирит-пренитовым прожилкам. Крайне высокие содержания кобальта в пирите некоторых из этих прожилков позволяют предполагать наличие включений самостоятельных кобальтовых минералов, установленных Т. А. Великоборец для пирита Соколовского месторождения [2]. Значительно снижаются содержания кобальта в пирите поздних пирит-гематит-кальцитовых и пирит-халькопиритовых прожилков. Повышенное

содержание кобальта в арсенопирите (см. табл. 1), являющемся на месторождении одним из самых поздних сульфидов, позволяет высказать предположение о проявлении на месторождении самостоятельной сульфоарсенидной стадии [5], в которую мог происходить некоторый привнос кобальта. Минимальные содержания кобальта отмечаются в прожилках из зон нарушений с рассланцованным перетертым пиритом, что согласуется с данными Т. А. Великоборец [1] о высвобождении кобальта из пирита в процессе метаморфизма.

Таблица 7

Содержание кобальта в различных морфологических разновидностях магнетита жил

Описание жил	Описание магнетита	Число анализов	Содержание кобальта, усл. ед.		
			минимальное	максимальное	среднее
Жилы крупнокристаллического магнетита с пиритом. Мощность 5—30 *см*	Шестоватый с признаками геометрического отбора из призальбандовой зоны	5	2,5	10	5,5
	Пластинчатый из центральных частей жилы	5	0	7,5	3,2
Прожилки гигантозернистого магнетита. Мощность до 10 *см*	Октаэдрического габитуса	3	5	7,8	6

На примере крупнокристаллических магнетитовых жил, распространенных в северной части карьера, установлено (табл. 7), что шестоватый магнетит из зальбандовых частей жил и гигантозернистый магнетит октаэдрического габитуса содержат одинаковое количество кобальта, пониженное содержание кобальта в пластинчатом магнетите скорее всего связано с перераспределением его в пирит прожилка.

Результаты анализов пирита и магнетита показывают, что по мере укрупнения выделений пирита и магнетита как в рудах, так и в прожилках содержание кобальта в них уменьшается:

	Пирит			Магнетит		
Характер и размеры выделений в рудах, *мм*	Вкрапленный	Гнездовый	Струйчатый	Меньше 1	1—3	3—5
Число анализов	17	3	6	3	25	2
Содержание кобальта, усл. ед.:						
минимальное	210	188	182	0	0	0
максимальное	570	440	472	6,2	8	2,5
среднее	365	338	330	3,8	1,5	1,2
Размеры выделений в прожилках, *мм*	1—3	3—5	Больше 5	Меньше 3	3—5	Больше 5
Число анализов	31	24	13	7	7	14
Содержание кобальта, усл. ед.:						
минимальное	52	25	25	0	0	0
максимальное	3225	2135	915	12,5	7,5	10
среднее	452	435	315	5,2	4	4,5

В пирите руд отмечается снижение содержаний кобальта от вкрапленного к струйчатому, т. е. по мере увеличения количества пирита на единицу объема окружающего магнетита [6]. С другой стороны, такое соотношение в уровне кобальтоносности является отражением различ-

ной генетической природы пирита: вкрапленный, как правило, возникает метасоматическим путем по магнетиту и отчасти нерудным, гнездовый — скорее всего за счет собирательной перекристаллизации вкрапленного, а струйчатый — в результате замещения нерудных прослоев.

Как видно в результате анализов магнетита, по мере укрупнения зерен магнетита содержание кобальта в нем уменьшается, причем для магнетита руд более резко, чем для магнетита прожилков. С другой стороны, в пирите прожилков из различных по структуре руд кобальтоносность возрастает по мере укрупнения зерен магнетита в окружающей руде (табл. 8). Это позволяет предположить, что образование пирита прожилков шло на фоне частичной перекристаллизации магнетитовых руд, в результате чего освобождавшийся из магнетита кобальт обогащал пирит прожилков.

Таблица 8

Содержание кобальта в пирите прожилков из различных по структуре руд

Структура руды	Число анализов	Содержание кобальта в пирите прожилков, усл. ед.		
		минимальное	максимальное	среднее
Сплошные руды				
тонкозернистые	2	152	310	230
мелкозернистые	7	120	665	365
среднезернистые	5	228	1048	518
крупнозернистые из зон перекристаллизации	2	602	1272	938
	16	120	1272	468

Таким образом, в результате проведенных исследований установлена прямая зависимость между содержаниями кобальта, серы и железа в руде и обратная зависимость между содержанием кобальта в пирите и количеством пирита в руде. Средние содержания кобальта в пирите, магнетите и гематите прожилков (при крайне неравномерном его распределении) выше, чем в соответствующих минералах руд. С возрастанием содержания железа в окружающей прожилок породе или руде содержание кобальта в пирите прожилков увеличивается. С увеличением размера выделений пирита и магнетита содержание кобальта в них уменьшается. Содержание кобальта в прожилковом пирите возрастает от ранних парагенезисов к поздним, достигая максимальных значений в эпидот-пирит-гематитовых и эпидот-пирит-пренитовых прожилках, а затем постепенно снижается.

В свете полученных данных происхождение и схема локализации кобальта в сульфидных минералах представляется нам в следующем виде. Источником кобальта служили в основном магнетитовые руды. Высвобождение и переход его в позднее образованные сульфиды осуществлялся в процессе проработки толщ руды, вероятно, гидротермальными растворами. Наибольшая интенсивность этого процесса совпала с периодом привноса серы. В итоге он не только привел к обогащению руд сульфидами, но и явился важнейшим фактором перекристаллизации магнетитовых руд. Перекристаллизация протекала как длительное сосуществование преимущественного растворения мелких зерен магнетита, имеющих относительно бо́льшую поверхность, и роста крупных за счет растворенного материала мелких зерен и кристаллов. Таким образом, степень перекристаллизации руд выступает, с одной стороны, критерием интенсивности гидротермальной переработки руд растворами, а с другой — показателем относительного количества перераспределен-

него из магнетита кобальта. Вследствие малой подвижности кобальта диффузия его через неподвижные поровые растворы и тем более ионная диффузия в твердом состоянии имела ограниченное распространение. Исключительно широкое и многократное проявление тектонических процессов на месторождении создало благоприятные условия для интенсивной миграции этих элементов путем фильтрации как поровых, так и поступавших из глубин дополнительных порций растворов в тектонически ослабленных зонах и трещинах. Такое заключение подтверждается не только весьма неравномерным характером распределения участков перекристаллизованных руд, как правило, имеющих характер линз, гнезд, прожилков с невыдержанной мощностью, но и повсеместно повышенной в них кобальтоносностью пирита.

Параллельно с отложением сульфидов в процессе переработки толщ руды поровыми растворами, насыщенными H_2S, OH, CO_2 и другими компонентами, происходит интенсивное разложение образовавшихся ранее безводных силикатов (граната, пироксена). Одновременно с сульфидами в трещинах и брекчированных зонах отлагаются минералы среднетемпературной ассоциации — апатит, эпидот, актинолит, пренит. Именно с этими минералами в прожилках ассоциирует наиболее кобальтоносный пирит.

ЛИТЕРАТУРА

1. Великоборец Т. А. Кристалломорфология и кобальтоносность пирита. Докл. АН СССР, 1969, т. 189, № 1.
2. Великоборец Т. А., Лукьянченко Е. М. О формах нахождения кобальта в пирите. Геохимия, 1970, № 7.
3. Изоитко В. М. Некоторые закономерности распределения сульфидной минерализации Сарбайского месторождения. — Геология рудн. м-ний, 1966, № 2.
4. Кочергин И. А., Пятунин В. К., Гайс С. Н. Элементы-примеси в рудах Соколово-Сарбайской группы магнетитовых месторождений.—Тр. Каз. ИМС, вып. 7, 1962.
5. Крутов Г. А. Месторождения кобальта. Госгеолтехиздат, 1959.
6. Руденко Н. И., Бузура В. П., Салимбаев А. С. Закономерности распределения кобальта в минералах руд на участке Соколовского карьера. Серия: геол., методы поисков и разв. м-ний цв. и редк. металлов. Изд. ВИЭМС, № 4, 1970.