Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института, том XXXII, вып. 3, 1956 г.

УСТАНОВЛЕНИЕ СТЕПЕНИ МЕТАЛЛОНОСНОСТИ ОТДЕЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Доц. *В. Н. Никифоров*

Основной задачей фазового анализа при оценке полезных ископаемых как объектов технологической переработки является выяснение того, какими минералами представлен и как количественно распределен между ними ценный металл. Не менее важное значение имеет количественная оценка полезного компонента, находящегося в состоянии тонкого рассеяния во вмещающей породе, или нежелательной (вредной) примеси в составе самого рудного минерала. Часто встречаемые в практике подобных исследований разнообразные формы взаимосвязи минералогических компонентов также нуждаются в определении и количественном учете.

Фазовый анализ включает также вопрос о формах и степени металлоносности отдельных составляющих рудного сырья.

Одним из основоположников так называемого количественного химико-минералогического анализа является профессор Ленинградского горного института К. Ф. Белоглазов. Под его руководством и при его непосредственном участии разрешены многочисленные проблемы обогащения минерального сырья отечественных месторождений и установлен ряд оригинальных методик химического исследования состава полезных ископаемых. Так были разработаны метод установления содержания изоморфной примеси железа в цинковой обманке (1922 г.), метод выяснения состава внутренней органогенной золы углей и определения «пиритной» и «органической» серы (1923 г.), возможность установления распределения железа и глинозема по минеральным компонентам бокситовых руд (1924 г.), оригинальная реакция для определения открытой поверхности халькопирита в рудах (1924—1926 гг.), метод количественной оценки распределения меди по формам ее соединений в окисленных медных рудах (1927 г.) и многие другие.

Эти исследования открыли путь к объективной и глубокой оценке технологических особенностей минерального сырья, имеющей первостепенное научное и практическое значение.

Таким образом, химической школе Ленинградского горного института принадлежит заслуга зарождения еще одной новой и весьма плодотворной отрасли знания.

Принципиально установление вещественного состава несложных объектов может быть достигнуто как физическими или физико-химическими методами разделения — в тяжелых жидкостях, на концентрационных столах, электромагнитных сепараторах или применением флотации, — так и с помощью избирательного химического растворения. По-

мимо большей точности химического метода, разделение путем физических способов ограничено размерами вкрапленности разделяемых компонентов. При тонкой вкрапленности интересующего нас минерала материал должен быть соответствующим образом измельчен. Достичь чистоты разделения в этих условиях невозможно вследствие резко возрастающего механического увлечения мелочи.

Поэтому выяснение вещественного состава ископаемых даже для сравнительно простых объектов производится чаще путем применения химического рационального анализа.

Вопрос о формах и степени металлоносности отдельных составляющих руды количественно решается также главным образом химическим методом исследования. Химические методы определения металлоносности позволяют учесть и те компоненты полезного ископаемого, которые содержат в той или иной форме ценный металл, но в то же время не являются соединениями этого металла. Количественная оценка степени металлоносности таких компонентов дополняет вещественный состав исследуемого объекта, правильно ориентирует направление технологических исканий и позволяет предвидеть качество концентрата и возможные результаты разделения.

Рассмотрим несколько примеров установления степени металлоносности отдельных компонентов полезных ископаемых различного состава:

1) железистости цинковой обманки в цинковых или полиметаллических рудах;
2) никеленосности пирротина в сульфидных никелево-медных рудах;
3) никеленосности силикатов вмещающей породы в тех же рудах;
4) золотоносности пирита в сульфидных рудах.

1. Химический метод количественного определения степени железистости цинковой обманки в сульфидных цинковых или полиметаллических рудах

Описываемый ниже способ может служить классическим примером установления степени металлоносности одного из компонентов полезного ископаемого.

При металлургической переработке цинковых концентратов железо является одной из наиболее нежелательных примесей. Поэтому при обогащении цинковых руд все устремления технологов направлены к максимально полному отделению соединений железа. При оценке с этой стороны смешанных руд следует иметь в виду, что, помимо индивидуализированных соединений (окислов, пирротина, пирита), железо обычно присутствует в составе самой цинковой обманки. Содержание в ней изоморфно связанного железа колеблется, в зависимости от вида цинковой обманки, в широких пределах и может превышать 30%.

Естественно, что эта категория железа не может быть отделена механическим путем и содержание его в цинковой обманке представляет неизбежный минимум в цинковом концентрате при полном отделении всех других железосодержащих соединений.

Таким образом, возможность независимого определения содержания железа, структурно связанного с цинком, представляет чрезвычайный интерес при исследованиях вещественного состава и природы полезных ископаемых.

Наиболее эффективным путем рационального анализа соединений железа в сульфидных цинковых рудах и концентратах является непродолжительная и многократно повторенная горячая кислотная обработка. Цель ее заключается в избирательном растворении пирротина и цинковой

обманки, т. е. в разделении комплекса сульфидных железосодержащих минералов (пирита и халькопирита от пирротина и цинковой обманки).

Методика определения степени железистости цинковой обманки заключается кратко в следующем. Разложение 5—10 *г* навески исследуемого материала [1] производится в закрытой колбе 150 *мл* 10%-ного раствора серной кислоты, предварительно нагретой до кипения. Выделяющийся при реакции сероводород улавливается в двух-трех последовательно соединенных с реакционной колбой поглотительных склянках с раствором уксуснокислого кадмия или медного купороса. Каждая отдельная операция обработки продолжается 5 мин. при кипячении и непрерывном токе углекислоты.

Затем раствор разбавляется до 500 *мл* холодной водой и по вытеснении током углекислоты из реакционной колбы всего сероводорода прибор разъединяется. Материалу в колбе дают отстояться и затем осторожно декантируют раствор, идущий в анализ на содержание цинка и железа. В растворах поглотителей определяется содержание серы. Ставятся новые склянки с поглотителем, прибор вновь соединяется, в течение нескольких минут пропускается ток углекислоты для вытеснения воздуха и оставшийся от обработки материал в колбе заливается свежей порцией нагретой до кипения серной кислоты. Эта операция продолжается до тех пор, пока в поглотительных склянках не прекратится образование осадка.

По каждой отдельной операции обработки подсчитывается отношение переходящих в раствор цинка и железа, позволяющее судить о характере растворяющихся соединений. Если растворяется химическое соединение или вообще химически однородное вещество, то относительное количество его составляющих, переходящих в раствор, должно быть все время постоянным. Кроме того, суммарное количество металлов — цинка и железа (в грамматомах), переходящих в раствор при каждой обработке, должно быть равно количеству серы. При растворении смеси соединений соотношение цинка и железа в растворе будет различно. Располагая данными избирательного растворения, нетрудно рассчитать вещественный состав исходного материала в части рудных компонентов и состав самой цинковой обманки.

В качестве примера подобного исследования приведем данные избирательного растворения бедного цинкового концентрата трудно обогатимой железо-цинковой руды. Для достижения возможно более полного растворения цинковой обманки понадобилось двенадцать последовательных операций обработки разбавленным раствором серной кислоты при кипячении. Результаты анализа кислотных вытяжек и конечного нерастворимого остатка на содержание цинка и железа, а также растворов поглотителя — на серу сведены в табл. 1 и 2, а величины отношений растворимых цинка к железу и извлечения их показаны на рис. 1 и 2.

Как видно из графика, величины отношений $\frac{Zn}{Fe}$ незначительно колеблются около среднего значения, равного 4,07 (за исключением результатов первой и последней обработок [2]), т. е. преобладающая часть

[1] Желателен материал примерно однородной крупности, так как это позволяет затягивать процесс растворения и избегать необходимости фильтрования после каждой операции.

[2] В расчет среднего значения отношения цинка к железу не вошли результаты первой и двенадцатой обработок. Первая обработка характеризуется растворением железистых составляющих, а абсолютные значения содержаний растворимых компонентов при последней обработке настолько низки, что не представляются аналитически надежными.

цинковой обманки исследованного концентрата представлена почти однородными по составу зернами, в которых цинк связан с железом в отношении 4 1. Таким образом, данная цинковая обманка приближается к наименее железистому типу — марматиту с отношением цинка к железу,

Таблица

Результаты опытов по установлению степени железистости цинковой обманки в концентрате железо-цинковой руды

Номер обработки	Перешло в раствор, % от исходного материала			Выход конечного остатка, % от исходного	Извлечение, % от содержания растворимых		Отношение растворимых $\frac{Zn}{Fe}$
	Zn	Fe	S		Zn	Fe	
1	0,58	3,20	2,12		2,3	35,0	0,2
2	5,59	1,31	3,54		22,5	14,4	4,2
3	3,66	0,95	2,37		14,7	10,4	3,8
4	3,44	0,93	2,25		14,0	10,2	3,6
5	3,18	0,70	1,99		12,7	7,6	4,4
6	2,63	0,67	1,69	31,0	10,5	7,3	4,0
7	2,29	0,54	1,46		9,2	6,0	4,2
8	1,51	0,34	0,94		6,0	3,7	4,4
9	1,38	0,35	0,89		5,5	3,7	4,0
10	0,58	0,14	0,37		2,3	1,5	4,1
11	0,08	0,02	0,05		0,3	0,2	4,0
12	0,02	0,004	0,006		0,01	0,04	5,0
	24,94	9,16	17,68		100,0	100,0	4,07 Среднее

Таблица 2

Состав исходного материала концентрата и остатка после избирательного растворения пирротина и цинковой обманки

Наименование определения	Состав остатка по данным анализа, %	Количество элементов в остатке % от исходного материала	Содержание в исходном материале опыта (концентрате), %	
			по расчету	по анализу
Нерастворимый остаток	68,06	21,10	21,10	21,06
Zn	1,16	0,36	25,30	25,23
Fe	13,55	4,20	13,36	13,37
Cu	1,03	0,32	0,32	0,33
S	10,84	3,36	21,04	21,10

равным 3,5. Близкое совпадение расчетных данных, полученных по результатам избирательного растворения, с содержаниями в исходном концентрате по химическому анализу убеждают в надежности проведенного опыта.

Материал конечного остатка был подвергнут для контроля микроскопическому анализу, подтвердившему полноту растворения цинковой обманки

Полученные данные избирательного растворения позволяют рассчитать вещественный состав рудной части цинкового концентрата, а также состав самой цинковой обманки.

Вещественный состав рудной части цинкового концентрата, %

Растворимая цинковая обманка с содержанием:	
ZnS	37,4
FeS	9,8
Σ (ZnFe) S	47,2
Структурно свободный пирротин	4,6
Цинковая обманка, скрытая в нерастворимых минералах (пирит, халькопирит и пустая порода)	0,54
Пирит	8,4
Халькопирит	0,9
Нерастворимая часть пустой породы	21,1

Состав цинковой обманки, %

Zn	53,3
Fe	13,1
S	33,6
	100,0

Как свидетельствует экспериментальный материал, содержание структурно связанного с цинком железа в составе цинковой обманки получается равным 13,1%. Это и будет минимальное содержание железа в чистом цинковом концентрате при условии полного отделения всех других железосодержащих минералов и пустой породы.

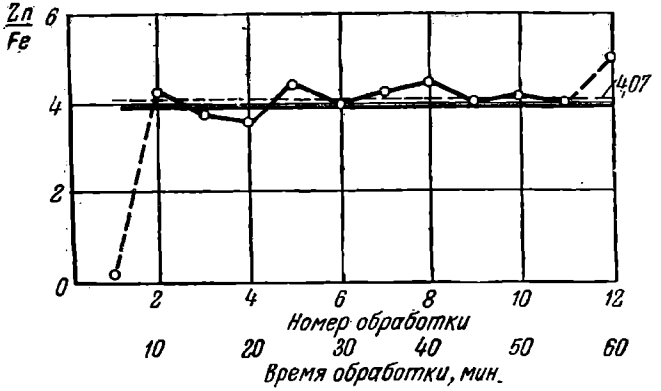


Рис. 1. Характеристика состава растворяющихся соединений Zn и Fe из концентрата Кузнецкой железо-цинковой руды

2. Определение степени никеленосности пирротина

Работами по исследованию состава бедных вкрапленных никелево-медных сульфидных руд Заполярья был выявлен ряд особенностей рудного объекта. К их числу в первую очередь относятся: сложный состав сульфидного комплекса, находящегося в состоянии тонкодисперсного срастания; многообразие соединений никеля и наличие легко разлагаемой кислотами силикатной породы. Наряду с самостоятельными никелевыми сульфидами была обнаружена несомненная никеленосность пирротина и части минералов вмещающей силикатной породы.

Эти неблагоприятные особенности делают указанные руды весьма сложным объектом, не имеющим аналогов в технологии переработки и практике работ по исследованию вещественного состава.

Тесная взаимная связь всех сульфидов рудного комплекса и никеленосность пирротина обусловливали необходимость извлечения всего пирротина в концентраты. Следовательно, для оценки состава руд и

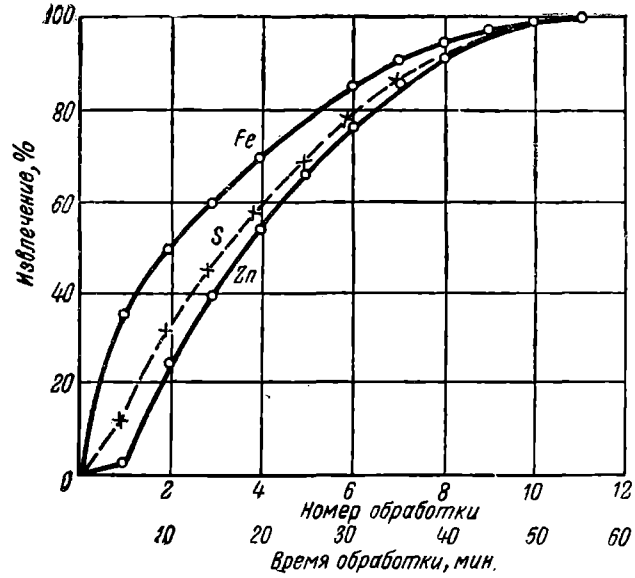


Рис. 2. Кинетика растворения цинковой обманки и пирротина

продуктов их обогащения было важно найти способ суммарного определения категории «сульфидного» никеля. Кроме того, одной из существеннейших задач исследования являлось выяснение содержания и природы никеля в составе пирротина, а также разработка методики независимого определения этой формы никеля.

Попытки выделения из руды и богатых штуфных образцов чистого пирротина, предпринятые всеми доступными средствами физического и физико-химического разделения, не достигли своей цели. Поэтому единственно возможным путем решения вопроса о степени никеленосности пирротина оказывалось избирательное химическое растворение.

Способ химического разделения оставался также наиболее перспективным и при разработке методики рационального анализа основных форм соединений никеля — «сульфидного» и «силикатного». В категорию сульфидного никеля входит никель самостоятельных никелевых сульфидов — пентландита и миллерита, а также никель, заключенный в пирротине.

Экспериментальная проверка и сравнение результатов применения нескольких избирательных растворителей сульфидной формы выявили преимущества концентрированного раствора перекиси водорода. Принятый метод количественного определения «сульфидного» никеля состоит из цикла двух последовательно проводимых обработок пергидролем и раствором лимоннокислого аммония, который применяется после растворения образовавшихся при обработке пергидролем основных солей и гидрата окиси железа. Этот цикл обработок повторяется два-три раза до полного разложения сульфидов, о чем можно судить по прекращению реакции с пергидролем и отсутствию желтой окраски остатка при обработке его лимоннокислым аммонием. В объединенных растворах после разло-

жения перекиси водорода кипячением производится определение содержания никеля, отвечающего категории «сульфидного». Никель в конечном остатке от этих обработок представлен «силикатной» формой [1]. Следует иметь в виду возможность присутствия в рудном материале наряду с сульфидной и силикатной формами окисленных соединений никеля — сульфата, карбоната и свободных окислов. При избирательном растворении «сульфидного» никеля категория «окисленного» также перейдет в раствор. Чтобы получить отдельно содержание окисленного никеля, соединения его могут быть предварительно извлечены обработкой разбавленным раствором аммиака или нейтральной смесью солей (уксуснокислого аммония и сернистокислого натрия).

Способ непосредственного определения количества пирротина и содержащегося в нем никеля, подобный применяемому при выяснении состава цинковой обманки, в данном случае не пригоден вследствие одновременного с пирротином растворения в кислоте разлагаемых силикатных минералов породы, также содержащих никель и железо. Но полученные кислотной обработкой результаты могут быть использованы при условии дополнительного определения содержания «окисленного» и «силикатного» никеля. В этом случае содержание «пирротинового» никеля можно получить косвенным путем по разности между количеством никеля, переходящего в раствор серной кислоты [2], и суммой окисленного и силикатного никеля:

$$(Ni_{окислен} + Ni_{силикатн} + Ni_{пирротин}) - (Ni_{окислен} + Ni_{силикатн}) = Ni_{пирротин}$$

По другой методике рационального анализа сульфидных медноникелевых руд, разработанной К. Ф. Белоглазовым, после удаления окисленных соединений никеля и силикатов вмещающей породы [3] в качестве избирательного растворителя для пирротина рекомендовалась обработка при нагревании растворами щавелевой кислоты и аммиака. Обогащенный сульфидами остаток руды обрабатывается вначале горячим 5%-ным раствором щавелевой кислоты в течение 1—2 час. Вследствие трудности растворения щавелевокислого никеля отфильтрованный и промытый остаток после выщелачивания щавелевой кислотой обрабатывается аммиаком и весь цикл обработок повторяется 2—3 раза. В объединенных аммиачных и щавелевокислых растворах определяется содержание никеля, отвечающего никелю пирротина.

Определению содержания пирротина, «пирротинового» никеля и, следовательно, степени никеленосности пирротина был подвергнут материал четырех проб богатой сульфидной руды крупностью — 150 меш. С целью проверки и подтверждения результатов были применены оба описанных выше независимых способа (косвенный и прямой) рационального анализа никелевых соединений. Экспериментальные данные (табл. 3, 4, рис. 3) обнаружили весьма близкое совпадение содержаний пирротинового никеля, определенного разными путями. Содержание никеля в пирротине или степень никеленосности последнего, рассчитанная для каждой пробы, оказалась равной 0,44—0,47%.

---

[1] Специально поставленными опытами было неоднократно подтверждено полное отсутствие взаимодействия пергидроля и лимоннокислого аммония с силикатными минералами породы.

[2] При выщелачивании серной кислотой до полного растворения пирротина в раствор перейдет сумма «окисленного», «силикатного» и «пирротинового» никеля.

[3] С помощью повторных обработок материала смесью фтористого и лимоннокислого аммония при нагревании.

Таблица 3

Результаты опытов химической обработки для определения степени никеленосности пирротина

Содержание Ni, % (от руды)				Содержание Ni общего	Содержание Ni по формам соединений, % (от руды)				
						пирротинового			
окисленного (в растворе NH_4CH_3COO+ +Na_2SO_3)	пирротинового (в растворе $H_2C_2O_4$ и NH_4OH)	сульфидного (в растворе H_2O_2 и лимоннокислого аммония)	окисленного + пирротинового+силикатного (в растворе 5 % H_2SO_4)		окисленного	по результатам обработки $H_2C_2O_4$ и NH_4OH	по результатам обработок $Ni_{H_2SO_4}$ — — ($Ni_{ок}$ + +$Ni_{силикатн.}$)	пентландитового	силикатного
0,68	0,10	3,63	1,25	4,78	0,68	0,10	0,10	3,53	0,47
Не обнаружено	0,08	4,24	0,38	4,53		0,08	0,09	4,15	0,29
Не обнаружено	0,13	3,19	0,33	3,39		0,13	0,08	3,06	0,20
Не обнаружено	0,18	3,33	0,35	4,08		0,18	0,20	3,73	0,15

Таблица 4

Количество пирротина и содержание никеля в пирротине по данным химических методов определения металлоносности

Распределение Ni, % от общего содержания					Содержание S-пирротина, % (по результатам обработки H_2SO_4)	Содержание пирротина по расчету %	Содержание Ni пирротинового %	Содержание Ni в пирротине, %
окисленного	пирротинового	пентландитового	силикатного	общего				
14,2	2,1	73,9	9,8	100,0	8,66	21,9	0,10	0,46
—	1,8	91,8	6,4	100,0	6,93	17,5	0,08	0,46
	2,4	90,3	7,3	100,0	11,75	29,7	0,13	0,44
	4,9	91,4	3,7	100,0	15,03	38,0	0,18	0,47

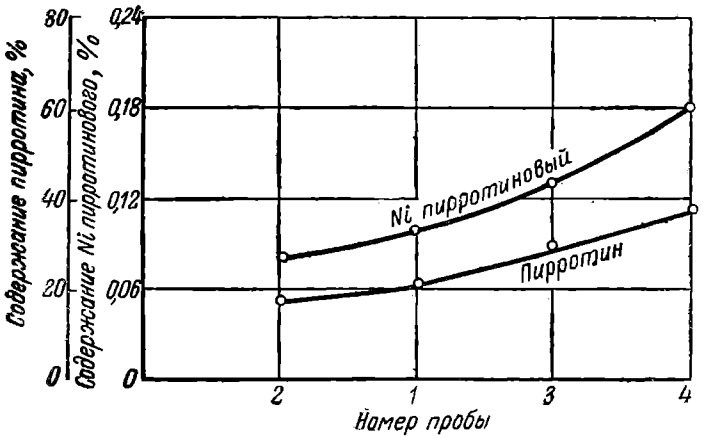


Рис. 3. Определение пирротина и пирротинового никеля методом избирательного растворения

В последних работах по исследованию никеленосности пирротинов различных никелево-медных месторождений Советского Союза с помощью изучения кинетики химического растворения пирротина в кислотах было найдено от 0,4 до 0,6% никеля в составе пирротина.

3. Определение степени никеленосности силикатной части сульфидных медно-никелевых руд

В опытах кислотной обработки материала некоторых рудных проб обнаруживались случаи перехода в раствор значительных количеств никеля несульфидного происхождения. Несульфидная природа части никеля подтверждалась весьма низкими содержаниями серы, улавливаемой в виде сероводорода, явно недостаточными для связывания всей меди и никеля, а также части железа в сульфиды. Наблюдаемое резкое несоответствие количеств никеля и серы могло иметь место либо за счет присутствия в пробах окисленных соединений никеля, либо вследствие наличия никеля в качестве изоморфной примеси в составе силикатов вмещающей породы.

Многочисленными опытами непосредственного определения окисленных форм соединений никеля путем применения в качестве избирательного растворителя растворов аммиака или нейтральной смеси солей было доказано в большинстве проб отсутствие сульфата, карбоната и окислов никеля [1].

Таким образом, подтвердилось предположение о наличии никеля в силикатной породе, тем более вероятное, что медно-никелевые руды характеризуются присутствием вторичных, обычно никеленосных, продуктов разрушения силикатов — серпентина и вторичной роговой обманки.

Располагая результатами кислотной обработки материала проб и данными рационального анализа по меди, можно распределить серу между сульфидами меди, пирротином и оставшуюся отнести к никелевым сульфидам [2]. Тогда недостающее количество никеля в пробах до цифры общего содержания по анализу составит никель «силикатный».

Ниже приводятся результаты подобных опытов для трех малосернистых проб с различным содержанием никеля. Расчет никелевых сульфидов произведен только на два минерала, найденные в руде минералогическим анализом, — пентландит и миллерит. Принят следующий состав этих минералов:

Пентландит	2FeSNiS (22,0% Ni; 42,0% Fe; 36,0% S);
Миллерит	NiS (64,8% Ni; и 35,2% S).

В зависимости от того, каким минералом представлен сульфидный никель, различное количество никеля будет связываться с силикатами пустой породы.

В результате указанных пересчетов получаем распределение никеля по составляющим (табл. 5, 6). Пределы содержания сульфидного и силикатного никеля получены из допущения, что весь сульфидный никель представлен или одним пентландитом, или только миллеритом.

При сопоставлении расчетных данных с содержанием сульфидного никеля в остатках кислотной обработки обнаруживается весьма близкое совпадение. Содержание никеля в остатках укладывается в найденные пределы содержания сульфидного никеля, располагаясь ближе к меньшим его значениям, отвечающим минералу пентландиту. Преобладающая

[1] В вытяжках были найдены тысячные доли процента никеля.
[2] Исключая пирит, не обнаруженный микроскопическим путем.

Таблица 5

Результаты расчета содержания сульфидной и силикатной форм никелевых соединений

Результаты химического и рационального анализа,									Распределение Ni, % от общего содержания		
Cu вторичных сульфидов	Cu халькопирита	S общая	S связанная в виде сульфидной меди	S в виде пирротина	S в виде сульфидного никеля (по разности)	Ni общий	Ni сульфидный (по расчету)	Ni силикатный (по разности)	Ni пирротиновый	Ni сульфидный	Ni силикатный
0,11	0,08	0,29	0,14	0,02	0,13	0,54	0,08—0,24	0,46—0,30		14,8—44,4	85,2—55,6
0,17	0,17	0,58	0,26	0,06	0,26	0,75	0,16—0,48	0,59—0,27	2,4	21,3—64,0	76,3—33,6
0,02	0,01	,10	0,02	0,01	'0,06	0,38	0,04—0,12	0,34—0,26		10,5—31,6	89,5—68,4

Таблица 6

Сопоставление опытных данных с результатами расчета

Пределы содержания сульфидного Ni % (по расчету)	Содержание сульфидного Ni в остатках от кислотной обработки % (от руды)	Содержание силикатного Ni, перешедшего в раствор при кислотной обработке, %
0,08—0,24	0,12	0,42
0,16—0,48	0,22	0,51
0,04—0,12	0,05	0,31

часть никеля этих проб оказывается представленной категорией «силикатного».

Выделение чистой силикатной породы и установление содержания в ней никеля произведено опытами разделения в тяжелой жидкости (удельного веса 3, 15) материала немагнитных фракций нескольких рудных проб. Было выяснено, что в легких фракциях, представленных пустой силикатной породой, присутствуют следы меди и 0,26—0,28% никеля, хотя при микроскопическом просмотре вовсе не обнаружено сульфидов никеля. В то же время содержание серы в легких фракциях оказывается достаточным для связывания всего никеля в сульфид.

Таким образом, вопрос о характере никелевых соединений, присутствующих в силикатных минералах породы, не был решен.

Из материала безрудных образцов пород были тщательно отобраны и подвергнуты оптическому и химическому исследованиям максимально чистые силикатные минералы. Исследованием установлено, что главными представителями силикатов вмещающей породы являются не разлагаемые кислотами пироксен, актинолит, полевой шпат, маложелезистая роговая обманка и разлагаемые кислотами оливин и вторичные продукты разрушения пироксена и оливина — серпентины. Вследствие близости свойств у большинства из них удалось выделить в чистом виде только по одному основному представителю каждой группы силикатных минералов — оливин и пироксен (бронзит). Они были охарактеризованы как достаточно чистые, содержащие лишь незначительное количество магнетита и единичные зерна сульфида меди.

Содержание никеля в оливине оказалось равным 0,29% при 0,03% серы, а в пироксене 0,07% никеля и 0,06% серы. Содержание железа в оливине, изоморфно замещающего магний, составляет 18 мол. %. Вследствие невозможности выделения в чистом виде вторичных силикатов (серпентина) и непосредственного выяснения содержания в них изоморфной примеси железа для расчета состава разлагаемой части руды было допущено, что группа серпентинизированных вторичных продуктов разрушения пироксенов и оливина представлена одним силикатным минералом — серпентином — и степень замещения (в молекулярных процентах) магния железом в оливине и серпентине условно считалась одинаковой.

Кислотная обработка проб руды с анализом растворов на основные компоненты силикатов, учитывая сделанные допущения, дала возможность получить расчетом содержание оливина и серпентина при одновременном их присутствии. Указанная методика расшифровки состава сили-

катной части с успехом применялась в практике работ по исследованию медно-никелевых руд и продуктов их обогащения и вполне себя зарекомендовала.

Определить для большинства проб содержание никеля в оливине и серпентине порознь, кроме случаев, когда один из этих минералов отсутствует, не представляется возможным. Чтобы судить о степени богатства никелем отдельных разлагаемых силикатов, пришлось прибегнуть к построению диаграммы (рис. 4), где нанесены пробы по содержанию

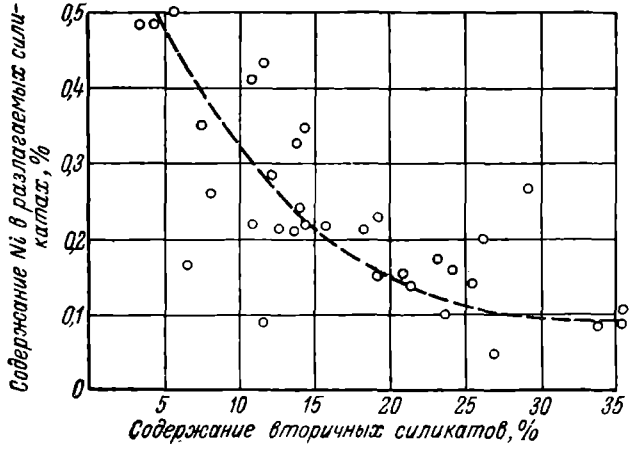


Рис. 4. Степень богатства никелем вторичных силикатов

вторичных силикатов в зависимости от рассчитанного содержания никеля в разлагаемых силикатах. Точки на диаграмме, отвечающие отдельным пробам, расположились несколько раскиданно, что, вероятно, происходит от колебаний в содержании не учитываемого при этом оливина. Но общий характер расположения точек указывает на следующую закономерность: с увеличением содержания серпентина в пробах содержание никеля в разлагаемых силикатах падает. Следовательно, серпентин беднее никелем, нежели оливин.

Всесторонний анализ материалов работ по исследованию состава никелево-медных руд позволяет сделать следующие основные выводы о категории «силикатного» никеля:

1. Содержание никеля, изоморфно замещающего магний в разлагаемых силикатах породы, составляет для оливина около 0,3%, а для минералов группы вторичных серпентинизированных продуктов разрушения пироксенов и оливина (серпентин) — примерно 0,2%.

2. В минералах группы не разлагаемых кислотами силикатов (главным образом пироксена) содержание никеля значительно ниже и не превышает 0,06%. Установление природы этого никеля затрудняется обнаружением в остатках от кислотной обработки, где сосредоточены пироксены, небольших количеств серы, достаточных для связывания всего никеля в сульфид. Поэтому с равной степенью достоверности можно предположить, что «неразлагаемый» никель представлен либо тонкодисперсными включениями сульфида в породе, либо содержится в качестве изоморфной примеси в некоторых силикатных минералах неразлагаемой части руды. Малая изученность этих силикатных минералов, переменный состав большинства из них и чрезвычайная трудность их разделения не позволили выяснить количественный минералогический состав неразлагаемой части породы.

3. По величине флотационной активности силикатные компоненты располагаются в порядке, обратном их степени никеленосности, т. е. пироксены обладают наивысшей флотоактивностью, а оливин более низкой. Благодаря абсолютно низкому содержанию «неразлагаемого» никеля практическое значение его легкой извлекаемости в общем эффекте обогащения ничтожно, в то время как увеличение выхода концентрата за счет неразлагаемых силикатов, т. е. его разубоживание, достигает весьма значительной величины от массы продукта.

Таким образом, приведенные выводы определили дальнейшее направление работ по исследованию обогатимости бедных медно-никелевых руд. Для получения богатых концентратов с гораздо более низкими выходами, при том же извлечении никеля, очевидно, необходимо депрессирование или предварительное отфлотирование пироксенов.

Действительно, опыты двухстадиальной флотации, вначале силикатной, а затем сульфидной, дали значительно более высокие показатели как по концентрации, так и по извлечению никеля из руды.

4. Определение степени золотоносности пирита (или других компонентов сульфидных руд)

При обогащении медных, медно-цинковых или других сульфидных руд с хвостами флотации, преимущественно пиритными, уходит значительное количество золота — 20—40% от общего содержания. Проблема повышения эффективности обогатительного процесса требует установления метода контроля и оценки опытных результатов, т. е. выяснения характеристики крупности частиц золота, их формы, а также характера ассоциации с отдельными компонентами и ее количественной оценки.

Учитывая низкие по абсолютному значению содержания золота в хвостах флотации (обычно от долей грамма до 2—3 *г/т*), для выяснения степени золотоносности отдельных составляющих целесообразно применение механических приемов разделения. Они позволяют оперировать большим количеством материала, что важно для достижения более полного соответствия среднему составу пробы. Но ряд специфических особенностей сульфидных руд — тонкое взаимное прорастание рудных минералов, наличие легко шламующихся компонентов породы и другие — затрудняет применение этих операций и побуждает пользоваться наряду с ними химическими методами разделения компонентов и выделения золота. Кроме того, задача выяснения полной характеристики крупности включений зерен золота, их формы и состава не может быть решена без привлечения приемов химического избирательного растворения.

Вследствие химической инертности самородное золото обычно выделяется переведением в раствор всей остальной части полезного ископаемого (путем последовательной обработки различными растворителями). Значительно обогащенный золотом конечный остаток либо предварительно подвергается разделению по плотности (или отмучиванию в тяжелой жидкости), либо непосредственно идет на микроскопическое исследование, подсчет и замер зерен.

Для сульфидных материалов избирательным растворителем служит азотная кислота (1 2), для материала, подвернутого окислительному обжигу, — соляная кислота с хлористым оловом. В качестве растворителя для элементарной серы, выделившейся при первой обработке, применяются сероуглерод, растворы едкой щелочи или сернистокислого натрия. Плавиковая и серная кислоты служат для полного разложения и удаления силикатной части породы. Барит, присутствующий в пробах,

может быть разложен концентрированной серной кислотой при нагревании до 150°

Конечно, при всех химических обработках, а особенно при обработках азотной кислотой и едкой щелочью, вполне возможны значительные потери золота, если оно находилось в форме сульфидов или в тонкодиспергированном состоянии. Наличие такого золота может повести к переходу его в коллоидное состояние. Имея это в виду, увлеченное тонкодисперсное золото из всех растворов после химической обработки проб обязательно собирают путем добавления к растворам уксуснокислого свинца и осаждения последнего серной кислотой.

На основании данных ситового, шламового, химического, рационального и пробирного анализов фракций различной крупности на основные минералогические компоненты строятся диаграммы с линиями извлечения или распределения для каждого из них (в том числе и золота). По близости (согласованности хода) этих линий друг к другу можно судить о преимущественной связи золота с одним из минералогических компонентов руды.

Если к тому же методом амальгамации или цианирования в каждом классе крупности определено содержание свободного и связанного (закрытого) золота и характеристика его крупности, то ассоциация золота с определенными компонентами руды, а следовательно, и степень их золотоносности могут быть установлены количественно.

Этими несколькими примерами выяснения степени металлоносности имелось в виду проиллюстрировать большое значение и широкую применимость химических методов исследования вещественного состава при решении различных вопросов изучения и технологического использования полезных ископаемых. Детальные химико-минералогические исследования, приводящие к объективной оценке технологических особенностей минерального сырья, оказались весьма плодотворными и позволили глубоко проникать в специфику его строения.