

Л. Г. СУХОВ

**ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ МИНЕРАЛЬНЫМ  
И ХИМИЧЕСКИМ СОСТАВАМИ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД**

(Представлено академиком В. И. Смирновым 21 V 1971)

Сульфидные медно-никелевые руды характеризуются широкими вариациями минерального состава. На Талнахском и Октябрьском месторождениях Норильского района главными минералами наиболее распространенных промышленных типов руд являются пентландит, пирротин (в разных модификациях), кубанит, халькопирит и талнахит. Однако на всех стадиях разведки и эксплуатации месторождений основным критерием для суждения о свойствах руд являются результаты массовых химических анализов на отдельные элементы. Для определения количественных соотношений минералов непосредственные подсчеты под микроскопом нецелесообразны, так как для получения представительных результатов по каждой пробе потребуется значительное число этих трудоемких операций, а при широко распространенном бескерновом бурении скважин этот путь практически неприменим. Существующие методики вычисления минерального состава медно-никелевых руд по результатам их химического анализа<sup>(1, 2)</sup> либо не учитывают полиминеральности руд, либо требуют предварительно учета соотношений между главными минералами.

Нами предлагаются два метода оценки минерального состава руд. Первый из них — прямой расчет — возможен при условии производства рациональных анализов руд с определением сульфидных серы, железа, никеля и меди. В этом случае можно составить систему линейных уравнений в обобщенном виде:

$$\begin{aligned} S_{Cp} + S_{Cub} + S_{Po} + S_{Pn} &= S, \\ Fe_{Cp} + Fe_{Cub} + Fe_{Po} + Fe_{Pn} &= Fe, \\ Cu_{Cp} + Cu_{Cub} + Cu_{Po} + Cu_{Pn} &= Cu, \\ Ni_{Cp} + Ni_{Cub} + Ni_{Po} + Ni_{Pn} &= Ni, \end{aligned} \quad (1)$$

где S, Fe, Cu, Ni — содержание сульфидных серы, железа, меди и никеля в руде, а в левых частях уравнений — количества этих компонентов в минералах: Cp — халькопирите, Cub — кубаните, Po — пирротине, Pn — пентландите (все в весовых процентах). Если неизвестные в системе (1) выразить через содержания в руде халькопирита, кубанита, пирротина и пентландита, согласно их теоретическим составам, то число неизвестных сведется к четырем, а расширенная матрица системы будет выглядеть как

$$\left\| \begin{array}{cccc} 0,3492 & 0,354 & 0,4 & 0,3323 S \\ 0,3052 & 0,412 & 0,6 & 0,3255 Fe \\ 0,3456 & 0,234 & 0 & 0 \quad Cu \\ 0 & 0 & 0 & 0,3422 Ni \end{array} \right\|. \quad (2)$$

Решение матрицы (2) позволяет определить теоретическое содержание в руде каждого из указанных минералов. Возможную погрешность этого метода, обусловленную отклонениями составов минералов от теоретических, а также наличием различных модификаций пирротина и значительного количества талнахита в отдельных разновидностях беспирротинных

руд, можно существенно уменьшить, если воспользоваться средними составами реальных сульфидов (3) и на их основании составить матрицы, аналогичные (2), для каждого из типов руд: пирротинового, кубанитового, халькопиритового и руд с талнахитом. Так, для кубанитовых и талнахитовых руд они будут иметь вид, соответственно:

$$\left\| \begin{array}{cccc} 0,3520 & 0,3460 & 0,3718 & 0,3270 \text{ S} \\ 0,3200 & 0,4245 & 0,6227 & 0,3737 \text{ Fe} \\ 0,3230 & 0,2263 & 0,0010 & 0,0005 \text{ Cu} \\ 0,0037 & 0,0051 & 0,0030 & 0,2870 \text{ Ni} \end{array} \right\|, \quad (3)$$

$$\left\| \begin{array}{cccc} 0,3515 & 0,3460 & 0,3358 & 0,3320 \text{ S} \\ 0,3230 & 0,4245 & 0,3180 & 0,3875 \text{ Fe} \\ 0,3285 & 0,2263 & 0,3320 & 0,0042 \text{ Cu} \\ 0 & 0,0051 & 0,0157 & 0,2710 \text{ Ni} \end{array} \right\|. \quad (4)$$

В матрице (4) третий столбец отвечает не пирротину, как в (2) и (3), а талнахиту. Для типизации руд по данным химических анализов можно использовать дискриминантный анализ (4).

Другой предлагаемый метод заключается в построении стохастической модели зависимости содержания минералов от химического состава для руд отдельных месторождений. Так, для сплошных руд Талнахского месторождения важной является оценка количества кубанита поскольку значительная часть этих руд наряду с халькопиритом содержит от 5 до 70% кубанита. Обогащение же кубанитсодержащих руд по той же схеме, что и халькопирит-пирротиновых, влечет за собой потери кубанита и, естественно, меди.

Построение математической модели основано на том, что переход от руд пирротинового типа, через кубанитовые, к существенно халькопиритовым происходит с увеличением содержания меди в руде. При этом, если пересчитать состав руды на сульфидную массу (2), наблюдается закономерная тенденция изменения в последней количества кубанита и его соотношения с халькопиритом (рис. 1). Эмпирические кривые могут быть аппроксимированы уравнениями

$$\overline{\text{Cub}}_T = -109,8 + 20,44\text{Cu} - 0,595\text{Cu}^2 + 6 \sin \frac{\text{Cu} + 2}{8} \pi - 2 \sin \frac{\text{Cu} + 2}{4} \pi, \quad (5)$$

$$\Delta \overline{\text{Cub}}_T = -232,5 + 53,00\text{Cu} - 2,557\text{Cu}^2 + 0,03426\text{Cu}^3 + 5 \sin (0,2222\text{Cu} - 1,833) \pi, \quad (6)$$

где  $\text{Cub}_T$  — теоретическое содержание кубанита в сульфидной массе (в объемных процентах);  $\Delta \overline{\text{Cub}}_T$  — теоретическая доля кубанита в сумме кубанит + халькопирит; Cu — содержание меди в сульфидной массе (в весовых процентах). Первая формула справедлива при  $8 \leq \text{Cu} \leq 27$ , вторая — при  $6,2 \leq \text{Cu} \leq 28,4$ . Для определения  $\overline{\text{Cub}}_T$  в интервале  $6,2 \leq \text{Cu} < 8$  более надежные результаты дает соотношение

$$\overline{\text{Cub}}_T = 5,22\text{Cu} - 32,4, \quad (7)$$

а в интервале  $27 < \text{Cu} \leq 28,4$

$$\overline{\text{Cub}}_T = 85,2 - 3,0\text{Cu}. \quad (8)$$

При иных значениях Cu величины  $\overline{\text{Cub}}_T$  и  $\Delta \overline{\text{Cub}}_T$  не отличаются от нуля более чем на 0,5.

Сравнение фактических и теоретических кривых (рис. 1) показывает их значительную близость. При этом максимальные погрешности отвечают менее распространенным разновидностям руд (рис. 2), вследствие чего средние ошибки равны 0,64 и 1,26, а средние квадратичные отклонения

3,59 и 3,83 — для уравнений (5) и (6) соответственно. Проверка по критерию Фишера показывает близость найденных связей с эмпирическими данными.

Следует учитывать, что для определения содержания кубанита предлагаемым способом необходимо пользоваться результатами конкретных анализов проб руды, представляющих одну какую-либо ее разновидность. Из-за наличия максимума на обеих кривых и их грубосимметричного строения (рис. 1) расчет по усредненным пробам или средневзвешенным содержаниям, охватывающим различные минеральные типы руд, недопустим.

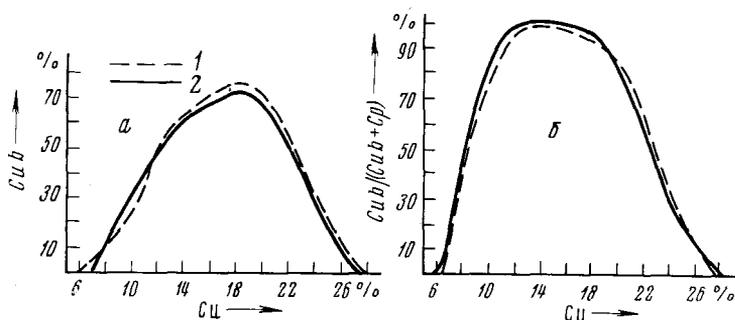


Рис. 1. Зависимость количества (а) и доли (б) кубанита в сульфидной массе руды от содержания в ней меди. 1 — эмпирические кривые (построены по данным 300 химических анализов и 500 минералогических подсчетов), 2 — теоретические

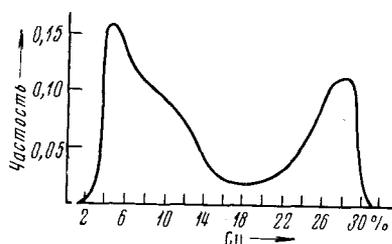


Рис. 2

Рис. 2. Распределение встречаемости сплошных сульфидных руд юга Талпахского месторождения с различным содержанием меди в сульфидной массе

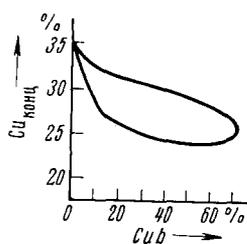


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость ожидаемого максимального содержания меди в медном концентрате от количества кубанита в сульфидной массе руды. Нижняя ветвь кривой отвечает пирротинсодержащим рудам, верхняя — существенно халькопиритовым

Влияние примеси нерудных минералов сказывается аналогично, хотя и не столь значительно, поэтому для надежности результатов целесообразно предварительный пересчет содержания меди в руде на сульфидную массу.

Уравнения (5) и (6) решаются при помощи простейших математических таблиц. Для практического использования можно также рекомендовать в качестве номограмм их графики (см. рис. 1). В пределах требуемой точности и фактические, и теоретические кривые вполне корректны, однако использование последних предпочтительнее для получения идентичных результатов аналитическим и графическим методами. Для большей простоты значения функций легко табулировать с такой дробностью, чтобы между фиксированными значениями была допустима линейная интерполяция (длина интервала, выраженная в содержании меди,  $d \leq 0,25\%$ ).

Зная среднюю долю кубанита ( $\overline{\Delta\text{Cu}}_{\text{T}}$ ) в сульфидной массе товарной руды и основываясь на теоретическом содержании меди в кубаните и халькопирите, можно прогнозировать содержание меди в медном концентрате в весовых процентах:

$$\text{Cu}_{\text{конц}} = 34,56 - 0,112\overline{\Delta\text{Cu}}_{\text{T}}. \quad (9)$$

Средняя ошибка (9), исходя из отклонения уравнения (6) от фактической кривой, около  $-0,15\%$ . При расчете минерального состава первым методом вместо  $\overline{\Delta\text{Cu}}_{\text{T}}$  в формулу (9) подставляется  $100\text{Cu}_{\text{T}} / (\text{Cu}_{\text{T}} + \text{Cr}_{\text{T}})$  из решения одной из матриц (2—4) или аналогичных для других типов руд. В правую часть (9) необходимо ввести поправочные коэффициенты на чистоту медного концентрата и соотношение степеней извлекаемости кубанита и халькопирита. Выявляется также зависимость выхода меди в медном концентрате от количества кубанита в сульфидной массе руды, но она имеет несколько более сложный вид (рис. 3).

Следует иметь в виду, что второй метод требует учета конкретных соотношений химического и минерального составов руд для каждого индивидуализированного объекта исследований (рудного поля, месторождения, залежи и т. п.). Для первого метода подобное ограничение отсутствует: содержание кубанита, халькопирита, пирротина, таллахита и пентландита может быть установлено в любых рудах, состоящих главным образом из этих минералов с той или иной примесью магнетита, независимо от их специфики.

Автор признателен начальнику научно-исследовательской обогатительной лаборатории Норильского комбината А. А. Калмыкову за плодотворный обмен мнениями.

Норильская опытно-методическая тематическая экспедиция  
Научно-исследовательского института геологии Арктики

Поступило  
17 V 1971

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> В. В. Ершов, Г. Б. Попова, Разведка и охрана недр, № 1 (1968). <sup>2</sup> И. Н. Горяинов, В. И. Ушаков, Уч. зап. Инст. геол. Арктики, регион. геол., в. 17 (1970). <sup>3</sup> Д. А. Додин и др., В сборн.: Геология и полезн. ископ. Норильского района, Л., 1971. <sup>4</sup> Л. Г. Сухов, ДАН, 196, № 4 (1971).